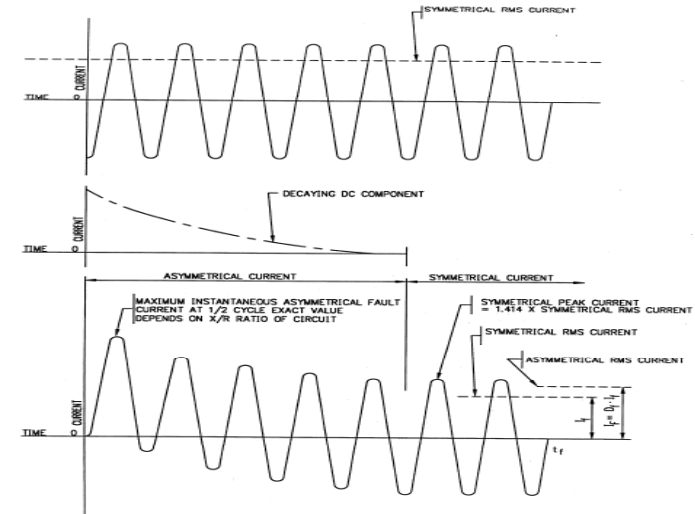


บทที่ 3

การหากระแสกริด

3.1 นิยาม

■ ออฟเซ็ทไฟตรง (dc offset)



ตัวประกอบการลดลง (decrement factor)

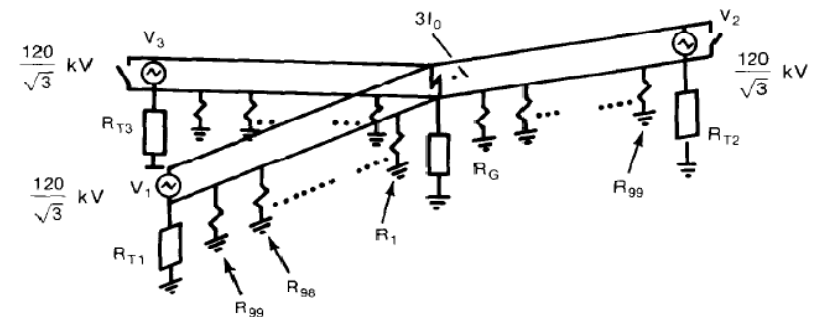
- ตัวประกอบการปรับเปลี่ยนที่ใช้ในร่วมกับพารามิเตอร์กระแสฟอลต์ลงดินสมมาตร ในการคำนวณการต่อลงดิน โดยสัมพันธ์กับความปลอดภัย (safety-oriented grounding calculations) ในการพิจารณาค่าสมมูล rms ของรูปคลื่นกระแสสมมาตร สำหรับช่วงเวลาฟอลต์ที่กำหนด t_f ซึ่งรวมไปถึงผลกระทบของออฟเซ็ท dc เริ่มต้น และการลดทอนของมันระหว่างที่เกิดฟอลต์

ตัวประกอบการแบ่งกระแสฟอลต์

(fault current division)

- แทนตัวประกอบในรูปส่วนกลับของอัตราส่วนของกระแสฟอลต์สมมาตร กับส่วนแบ่งของกระแสที่ไหลระหว่างกริดการต่อลงดินและดินโดยรอบ

Example System for Computation of Current Division Factor S_f



ตัวประกอบการแบ่งกระแสฟอลต์ (fault current division)

$$S_f = \frac{I_g}{3I_0}$$

เมื่อ

S_f คือตัวประกอบการหารกระแสฟอลต์

I_g คือกระแสกริดสมมาตร rms [A]

I_0 คือกระแสฟอลต์ลำดับศูนย์ [A]

กระแสกริดสูงสุด (maximum grid current)

$$I_G = D_f \times I_g$$

เมื่อ

I_g คือกระแสกริดสมมาตร rms [A]

I_G คือกระแสกริดสูงสุด [s]

D_f คือองค์ประกอบการลดลงสำหรับช่วงเวลาทั้งหมดที่เกิดฟอลต์ t_f [A]

กระแสกริดสมมาตร (symmetrical grid current)

- ส่วนย่อยของกระแสฟอลต์ลงดินแบบสมมาตรที่ใหญ่ระหว่างกริด การต่อลงดิน และดินโดยรอบ ซึ่งอาจจะเขียนสมการได้เป็น

$$I_g = S_f \times I_f$$

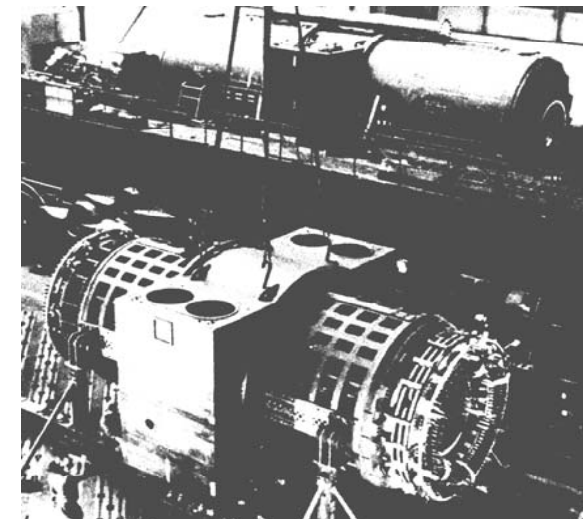
เมื่อ

I_g คือกระแสกริดสมมาตร rms [A]

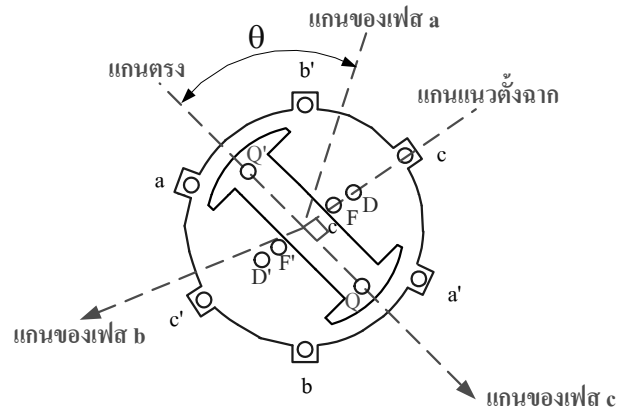
I_f คือกระแสฟอลต์ลงดินสมมาตร rms [A]

S_f คือตัวประกอบการแบ่งกระแสฟอลต์

รีแอคแตนซ์ของเครื่องกำเนิด

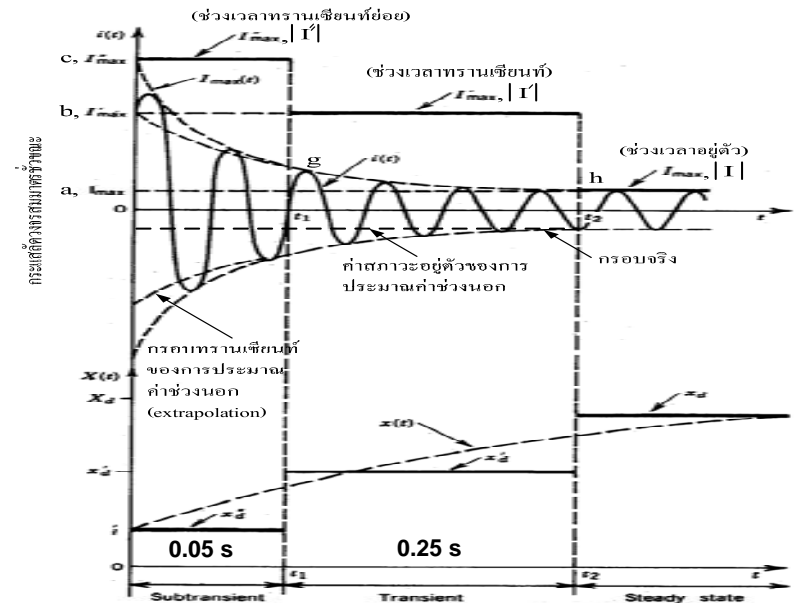


ภาพแสดงของเครื่องจักรกลซิงโครนัส



มุม θ เป็นมุมซึ่งแกนตรงของโรเตอร์อยู่หน้าแกนแม่เหล็กของเฟส a

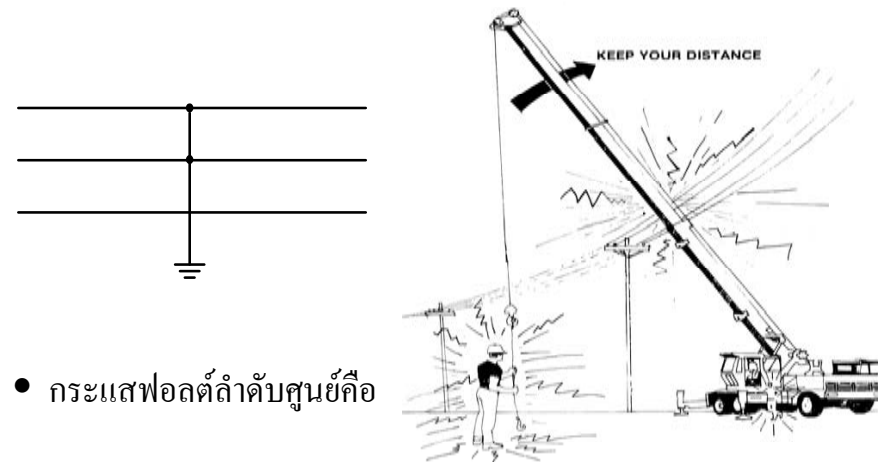
รีแอดแทนซ์ของเครื่องกำเนิดแบบซิงโครนัส



3.2 ขั้นตอนกระบวนการหาค่ากระแสกริดสูงสุด สำหรับการคำนวณการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

- (ก) ประเมินชนิดและตำแหน่งของฟอลต์ลงดิน เพื่อหากระแสกริดลงดิน โดยรอบที่ใหญ่มากที่สุด และเกิด GPR มากที่สุด และการกระจายศักย์ที่ผิวดิน ในพื้นที่สถานีไฟฟ้าย่อยมากที่สุด (หัวข้อที่ 3.8)
- (ข) คำนวณ ตัวประกอบการแบ่งกระแสฟอลต์ S_f สำหรับฟอลต์ที่เลือกในข้อ (ก) และการตั้งค่าที่สอดคล้องกับกระแสกริดสมมาตร (หัวข้อที่ 3.9)
- (ค) หาฟอลต์แต่ละชนิด โดยอยู่บนฐานช่วงเวลาต่อเนื่อง และค่าตัวประกอบลดลง D_f ที่ยอมได้จากผลของความไม่สมมาตรของรูปคลื่นกระแสฟอลต์ (หัวข้อที่ 3.10)
- (ง) เลือก $D_f \times I_g$ ที่มากที่สุด และสถานะฟอลต์ที่เลวร้ายที่สุด (ดูหัวข้อที่ 3.11)

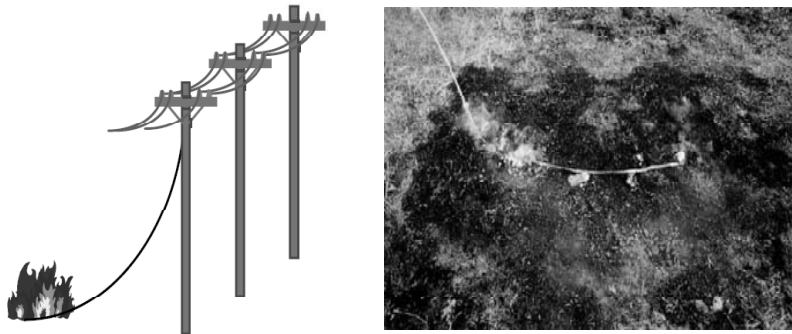
กรณีของสายกับสายลัดวงจรลงดิน



- กระแสฟอลต์ลำดับศูนย์คือ

$$I_0 = \frac{E \cdot (R_2 + jX_2)}{(R_1 + jX_1) \cdot [R_0 + R_2 + 3R_f + j(X_0 + X_2)] + (R_2 + jX_2) \cdot (R_0 + 3R_f + jX_0)}$$

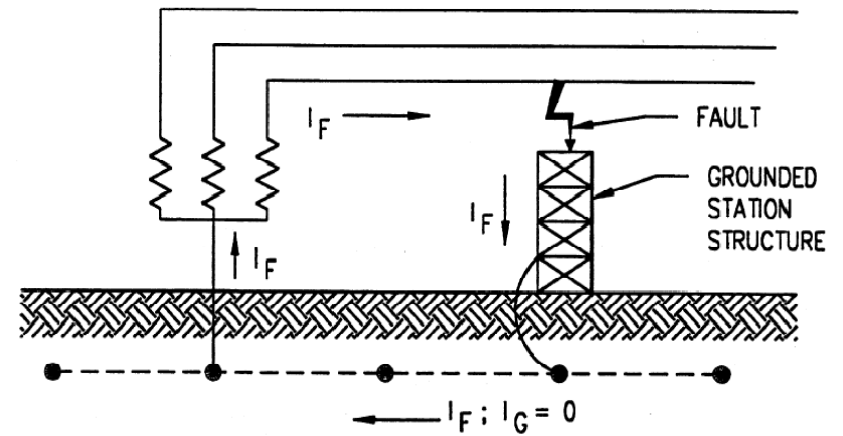
กรณีของฟอลต์แบบสายกับกราวด์



กระแสฟอลต์ลำดับศูนย์คือ

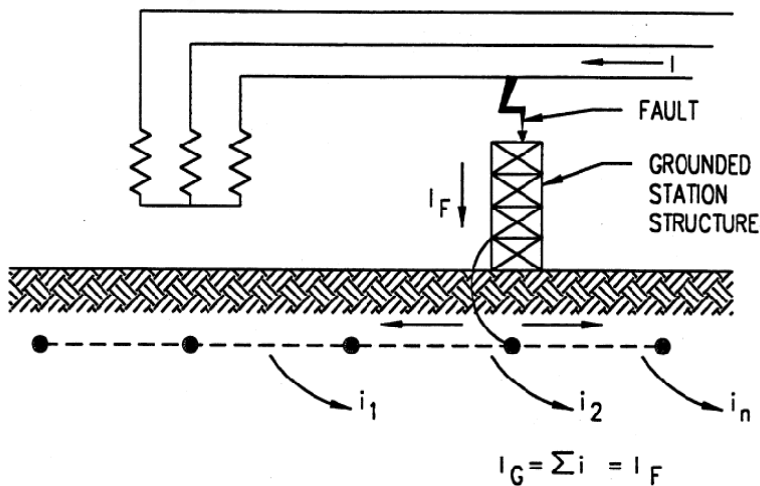
$$I_0 = \frac{E}{3R_f + R_1 + R_2 + R_0 + j(X_1 + X_2 + X_0)}$$

3.3 ชนิดของฟอลต์ลงดิน

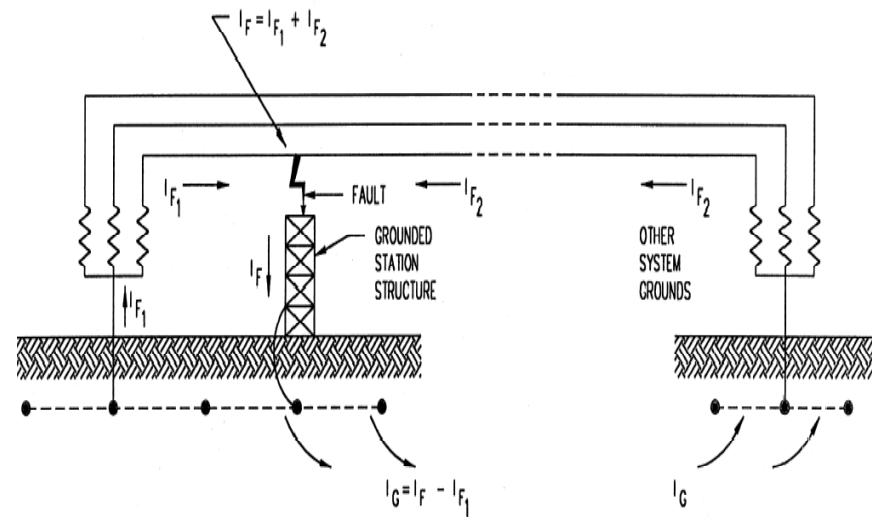


รูปที่ 3.1 ฟอลต์ภายในบริเวณสถานีไฟฟ้า นิวทรัลบริเวณนั้นถูกต่อลงดิน

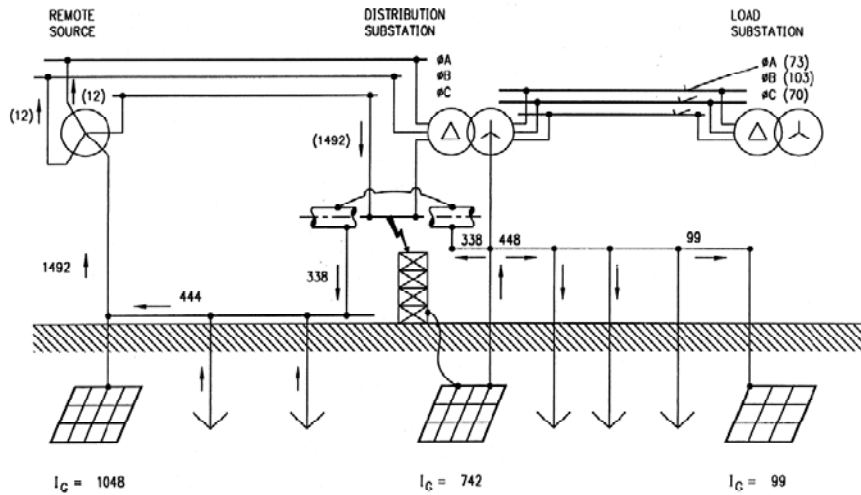
รูปที่ 3.2 ฟอลต์ภายในบริเวณสถานีไฟฟ้า นิวทรัลถูกต่อลงดินในตำแหน่งที่ไกลออกไป



รูปที่ 3.3 ฟอลต์ภายในสถานีไฟฟ้า ระบบถูกต่อลงดินที่บริเวณสถานีนั้น และที่จุดอื่น ๆ ด้วย



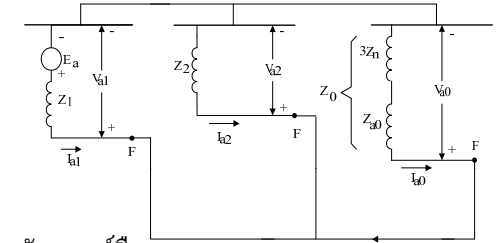
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างการแบ่งกระแสสำหรับฟอลต์ทางด้านแรงสูงของสถานีไฟฟ้าย่อยจำหน่าย



กระแสฟอลต์เมื่อละเทอมค่าความต้านทาน

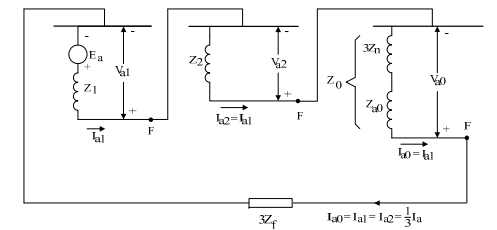
กระแสฟอลต์ลำดับศูนย์สำหรับฟอลต์สายกับสายลงกราวด์คือ

$$I_0 = \frac{E \cdot X_2}{X_1 \cdot (X_0 + X_2) + (X_2 + X_0)}$$



กระแสฟอลต์ลำดับศูนย์สำหรับฟอลต์สายกับกราวด์คือ

$$I_0 = \frac{E}{X_1 + X_2 + X_0}$$



3.4 ผลกระทบของค่าความต้านทานดินสถานีไฟฟ้าย่อย

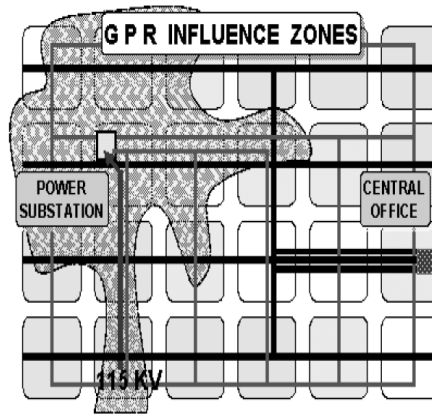
- ค่าความต้านทานดินของสถานีไฟฟ้าย่อย และค่าความต้านทานที่จุดเกิดฟอลต์ โดยปกติมีค่าน้อย จึงไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณา
- อย่างไรก็ตาม อาจจะมีกรณีผิดปกติที่ค่าความต้านทานดินของสถานีไฟฟ้าย่อยนั้นมีค่ามาก ซึ่งอาจจะต้องนำเอาค่าความต้านทานมาคิด โดยรวมค่าความเป็นจริงเข้าไป ซึ่งอาจจะหามาจากการวัดหรือการคำนวณค่าความต้านทานของดินในสถานีไฟฟ้าย่อย

3.5 ผลกระทบของค่าความต้านทานฟอลต์

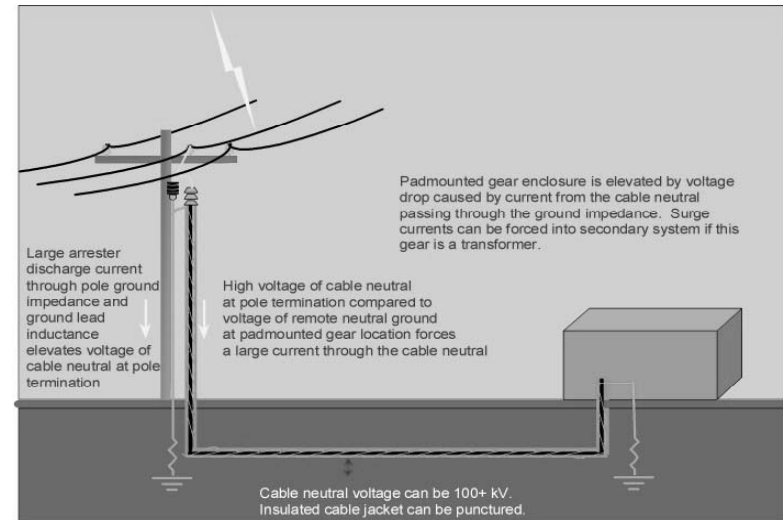
- ถ้าฟอลต์เป็นการเสียดสภาพฉนวนของฉนวนภายในสถานีย่อยภายใน สมมติฐานก็คือ ค่าความต้านทานของฟอลต์ถูกสมมติให้เป็นศูนย์
- ในกรณีของฟอลต์อยู่ภายนอกพื้นที่สถานีไฟฟ้าย่อยภายใน ค่าความต้านทานฟอลต์ R_f สามารถถูกกำหนดเพื่อใช้ค่านี้ในการคำนวณกระแสฟอลต์ลงกราวด์ สิ่งนี้ทำโดยการคูณ ด้วยสาม และการเพิ่มเทอมค่าความต้านทานอื่นๆ
- อย่างไรก็ตาม ในการคำนวณต่อไป ค่าความต้านทานฟอลต์จะละทิ้งไป เนื่องจากมีผิดพลาดใดๆ น้อยมาก

3.6 ผลกระทบของสายกราวด์เหนือศีรษะ และตัวนำนิวทรัล

- เมื่อสายส่งมีสายกราวด์เหนือศีรษะ หรือตัวนำนิวทรัล ได้รับการเชื่อมต่อกับกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อย ส่วนใหญ่ของกระแสฟอลต์ลงดินถูกเบี่ยงเบนออกไปจากกราวด์ที่กริดสถานีไฟฟ้าย่อย จึงควรจะถูกนำมาพิจารณาในการออกแบบกราวด์กริด



3.7 ผลกระทบของท่อที่ถูกฝังโดยตรง และสายเคเบิล



3.8 ชนิดและตำแหน่งฟอลต์ที่เลวร้ายที่สุด

- ชนิดฟอลต์ที่เลวร้ายที่สุดสำหรับระบบที่กราวด์ ที่ทำให้กระแสกริดสูงสุดมีค่าสูงที่สุด I_G
- กระแสกริดสูงสุดนี้เป็นสัดส่วนกับค่ากระแสฟอลต์ลำดับศูนย์ หรือกระแสกราวด์ฟอลต์ และตัวประกอบการแบ่งแยกกระแส

ชนิดฟอลต์เลวร้ายที่สุดสำหรับระบบกราวด์

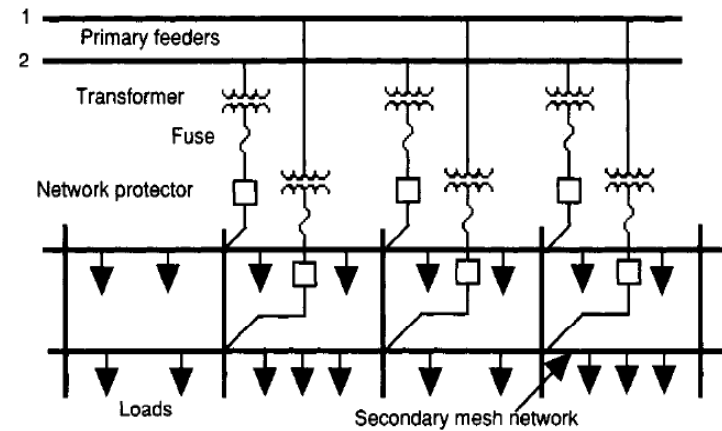
- ชนิดฟอลต์ที่ส่งผลต่อกระแสฟอลต์ลำดับศูนย์สูงที่สุดของระบบกราวด์ หรือกระแสกราวด์ฟอลต์ไหลไปสู่ดินเป็น $3I_0$ ในตำแหน่งที่กำหนดไว้
- ฟอลต์แบบสายเส้นเดี่ยวลัดวงจรลงกราวด์ จะเป็นชนิดฟอลต์ที่เลวที่สุด ถ้า $Z_0 > Z_2$ ที่จุดที่ฟอลต์
- ฟอลต์แบบสายเส้นสองเส้นลัดวงจรลงกราวด์ จะเป็นชนิดฟอลต์ที่เลวที่สุด ถ้า $Z_0 < Z_2$ ที่จุดที่ฟอลต์

ตำแหน่งฟอลต์ที่ผลิตกระแสกริดสูงที่สุด



- สำหรับสถานีไฟฟ้าย่อยการจำหน่าย กับหม้อแปลงที่ถูกต่อลงกราวด์ ทางด้านระบบจำหน่าย โดยปกติกระแสกริดสูงที่สุด I_G เกิดขึ้นกับกราวด์ฟอลต์ที่ขั้วทางด้านแรงสูงของหม้อแปลง

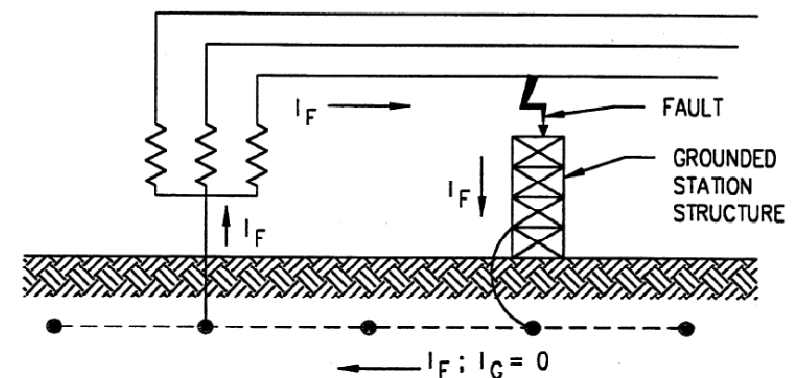
ถ้าทำงานในลักษณะขนานกันของหม้อแปลงหลายๆ ตัว จะส่งผลให้แหล่งจ่ายกระแสกราวด์ฟอลต์มีค่ามากขึ้นทางด้านต่ำ



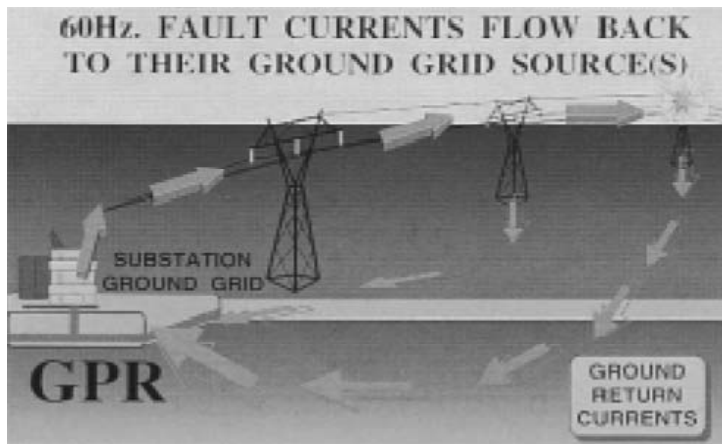
กระแสกริดสูงที่สุด อาจจะเกิดขึ้นกับกราวด์ฟอลต์บางแห่งทางด้าน
วงจรการจำหน่าย



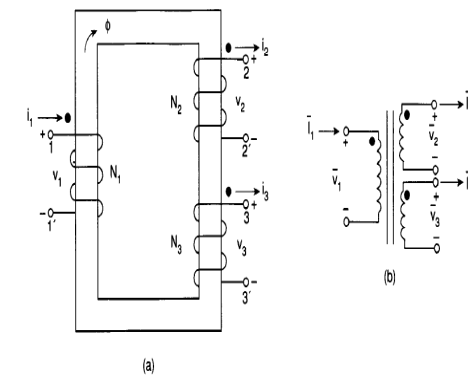
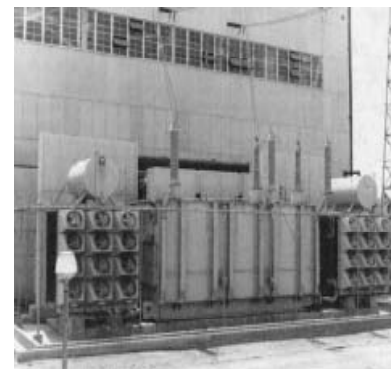
สำหรับกราวด์ฟอลต์ทางด้านขั้วของแรงต่ำ อย่างเช่นหม้อแปลงที่ถูกกราวด์ทางด้านทุติยภูมิ การกระจายของหม้อแปลงกับฟอลต์ที่หมุนเวียนในสายตัวนำกริดของสถานีไฟฟ้าย่อย จึงไม่มีผลกระทบต่อ GPR สถานีไฟฟ้าย่อย



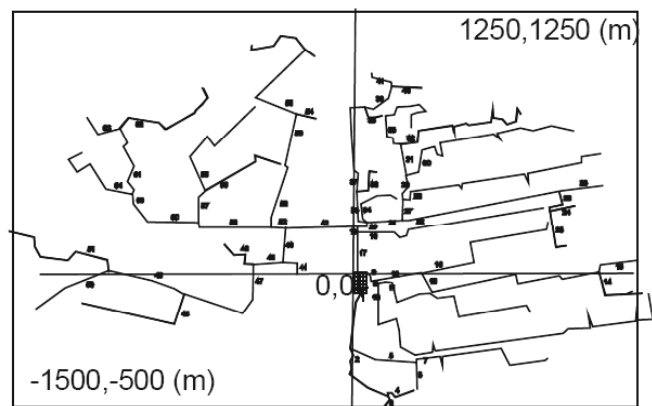
สำหรับกราวด์ฟอลต์ภายนอกสถานีไฟฟ้าอยู่ทางด้านสายป้อนของระบบจำหน่ายที่ไกลพอหรือในสถานีไฟฟ้าอยู่ระบบส่งกำลังไฟฟ้า (transmission substations) กระแสฟอลต์จะคืนกลับมาที่แหล่งจ่ายของมัน (นิวทรัลของหม้อแปลง) ผ่านทางกริดของสถานีไฟฟ้าอยู่ จึงเกิดการกระจายไปยัง GPR ของสถานีไฟฟ้าอยู่



ในสถานีไฟฟ้าอยู่ระบบส่งกำลังไฟฟ้า (transmission substations) หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสามขดลวด (three-winding transformers) กระแสกริดสูงที่สุด อาจเกิดขึ้นกับกราวด์ฟอลต์ทางด้านแรงสูงหรือทางด้านแรงต่ำก็ได้ จึงควรจะถูกตรวจสอบและคำนวณหาทั้งสองตำแหน่ง



ฟอลต์ที่เกิดขึ้นบางระยะทางจำหน่ายไปยังชนบท



Grounding system connected to cable network of existing 110/10 kV substation.

ฟอลต์ที่เกิดขึ้นบางระยะทางจำหน่ายไปยังชนบท

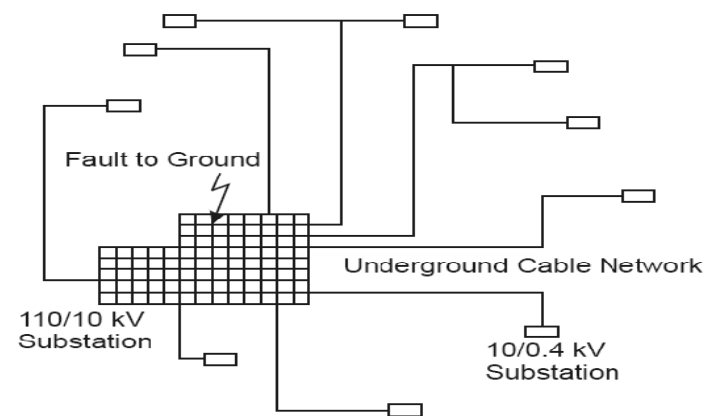
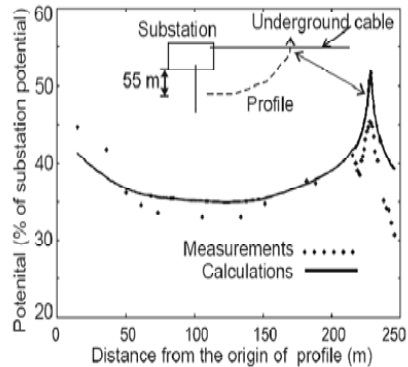


Figure 1: Grounding system of high voltage substation connected to underground cable network.

การกระจายไปยัง GPR ของสถานีไฟฟ้าย่อย



	70	77	77	70
E	77	80	80	77
	77	80	80	77
	70	77	77	70

Measured potential distribution for various ground mats

ช่วงเวลาของฟอลต์

- ช่วงเวลาของฟอลต์ขึ้นอยู่กับชนิดของแผนการป้องกันที่ใช้
- ตำแหน่งของฟอลต์
- ตัวเลือกของการใช้ช่วงเวลาในการตัดกระแสฟอลต์อันดับหนึ่ง หรือช่วงเวลาในการตัดกระแสฟอลต์สำรอง (primary or back-up clearing times)
- ช่วงเวลาฟอลต์ไม่เพียงแต่กระทบกับตัวประกอบการลดลง D_f เท่านั้น แต่ยังรวมถึงแรงดันที่สามารถทนทานได้อีกด้วย

3.9 การคำนวณการแบ่งแยกกระแส

- สำหรับสมมติฐานของการไหลที่ยังคงอยู่ของกระแสกราวด์ฟอลต์เริ่มต้น กระแสกริดสมมาตรสามารถหาได้จาก

$$I_g = S_f \cdot (3I_0)$$

เมื่อ

I_g คือ กระแสกริดสมมาตร

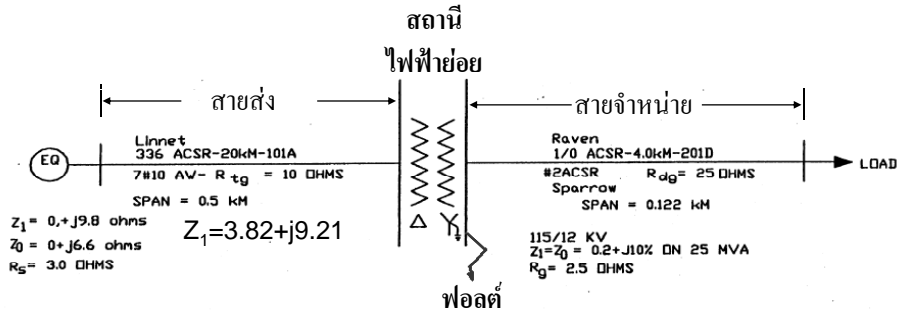
S_f คือ ตัวประกอบการแบ่งแยกกระแส ซึ่งจำเป็นต้องถูกคำนวณ

I_0 คือ กระแสลัดวงจรลำดับศูนย์

ตัวประกอบการแบ่งแยกกระแส S_f ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

- ตำแหน่งของฟอลต์
- ขนาดของกราวด์กริดอิมพีแดนซ์สถานีไฟฟ้าย่อย
- ท่อที่ถูกฝัง และสายเคเบิลในบริเวณใกล้เคียง หรือที่ถูกรวมต่อโดยตรงที่ระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อย
- สายกราวด์เหนือศีรษะ นิวทรัล หรือเส้นทางคืนกลับกราวด์อื่นๆ

ตัวอย่างการหาตัวประกอบกรแบ่งแยกกระแส S_f



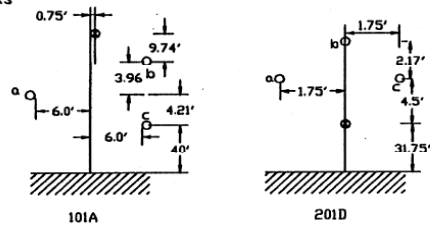
$$Z_1 = 0. + j9.8 \text{ ohms}$$

$$Z_0 = 0. + j6.6 \text{ ohms}$$

$$R_s = 3.0 \text{ OHMS}$$

$$Z_1 = 3.82 + j9.21$$

SOIL RESISTIVITY = 200 OHM-METERS



พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

R_{tg} คือ อิมพีแดนซ์ต่อสายของสายส่งแรงดันไฟฟ้า 115kV	[Ω]	$R_{tg} = 10.0 + j0.0 \text{ } \Omega/\text{section}$
R_{dg} คือ อิมพีแดนซ์ต่อสายของสายส่งแรงดันไฟฟ้า 12.47kV	[Ω]	$R_{dg} = 25.0 + j0.0 \text{ } \Omega/\text{section}$
R_s คือ ขั้วกราวด์ต่อพื้นดินของสายส่ง	[Ω]	$R_s = 3.0 + j0.0 \text{ } \Omega$
R_g คือ ขั้วกราวด์ต่อพื้นดินของสายส่ง	[Ω]	$R_g = 2.5 + j0.0 \text{ } \Omega$
Z_1 คือ อิมพีแดนซ์ต่อสายของสายส่ง	[Ω]	$Z_1 = 3.82 + j9.21 \text{ } \Omega$ for the 115 kV line
$Z_{0(a)}$ คือ อิมพีแดนซ์ต่อสายของสายส่ง	[Ω]	$Z_{0(a)} = 7.37 + j35.86 \text{ } \Omega$ for the 115 kV line
$Z_{0(g)}$ คือ อิมพีแดนซ์ต่อสายของสายส่ง	[Ω]	$Z_{0(g)} = 148.24 + j66.44 \text{ } \Omega$ for the 115 kV line
$Z_{0(sg)}$ คือ อิมพีแดนซ์ต่อสายของสายส่ง	[Ω]	$Z_{0(sg)} = 3.56 + j33.34 \text{ } \Omega$ for the 115 kV line
Z_0 คือ อิมพีแดนซ์ต่อสายของสายส่ง	[Ω]	$Z_0 = 12.54 + j39.72 \text{ } \Omega$ for the 115 kV line
Z_{s-1} คือ อิมพีแดนซ์ต่อสายของสายส่ง	[Ω/span]	$Z_{s-1} = 1.24 + j0.55 \text{ } \Omega/\text{span}$ for the 115 kV overhead static wire
Z_{s-f} คือ อิมพีแดนซ์ต่อสายของสายส่ง	[Ω/span]	$Z_{s-f} = 0.11 + j0.11 \text{ } \Omega/\text{span}$ for the 12.47 kV feeder neutral

อิมพีแดนซ์สายส่ง 115 kV กับอิมพีแดนซ์แหล่งจ่าย รวมกันเป็นอิมพีแดนซ์ฟอลต์สมมูลที่บัส 115 kV ดังต่อไปนี้

$$Z_{1(eq)} = 3.82 + j19.01 \Omega$$

$$Z_{0(eq)} = 12.54 + j46.32 \Omega$$

ดังนั้น สำหรับฟอลต์สายเดี่ยววงกราวด์ สำหรับระบบ 115 kV คือ

$$3I_0 = \frac{3E}{Z_{1(eq)} + Z_{2(eq)} + Z_{0(eq)}} \quad \text{แต่ } Z_{1(eq)} = Z_{2(eq)}$$

$$|3I_0| = \frac{3 \cdot 115,000 / \sqrt{3}}{2(3.82 + j19.01) + (12.54 + j46.32)} = |534.5 - j2238.8| = 2297 \text{ A}$$

การใช้วิธีของ Endrenyi อิมพีแดนซ์สมมูลของสายสถิตเหนือศีรษะ (ดังที่เห็นได้จากจุดฟอลต์และไม่นำผลของการเชื่อมโยงมาคิด) คือ

$$Z_{eq-1} = \text{span} \cdot Z_{s-1} + \sqrt{R_{tg} \cdot Z_{s-1}}$$

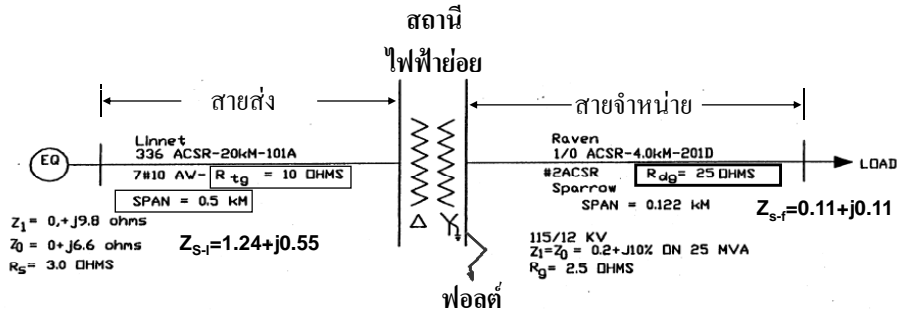
$$Z_{eq-1} = 0.5 \cdot (1.24 + j0.55) + \sqrt{10 \cdot (1.24 + j0.55)} = 4.22 + j1.04 \Omega$$

อิมพีแดนซ์สมมูลของสายป้อนนิวทรัล (ดังที่เห็นได้จากสถานีไฟฟ้าย่อย) คือ

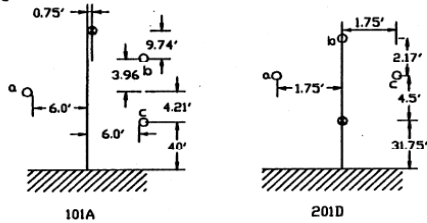
$$Z_{eq-1} = \text{span} \cdot Z_{s-f} + \sqrt{R_{dg} \cdot Z_{s-f}}$$

$$Z_{eq-f} = 0.5 \cdot (0.11 + j0.11) + \sqrt{25 \cdot (0.11 + j0.11)} = 1.88 + j0.89 \Omega$$

ตัวอย่างการหาตัวประกอบการแบ่งแยกกระแส S_f



SOIL RESISTIVITY = 200 OHM-METERS



ผลลัพธ์สมมูลของสายสติดเหนือศีรษะและสายป้อนนิวทรัล ถูกหาได้โดยการขนานกันกับอิมพีแดนซ์สมมูลที่กล่าวมาข้างต้น

$$Z_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{eq-1}} + \frac{1}{Z_{eq-f}}} = 1.31 + j0.52 \Omega$$

ตัวประกอบการแบ่งกระแส S_f คือ

$$S_f = \left| \frac{Z_{eq}}{Z_{eq} + R_g} \right| = \left| \frac{1.31 + j0.52}{(1.31 + j0.52) + 2.5} \right| = 0.37$$

และผลของกระแสกริด I_g คือ

$$I_g = S_f \cdot 3I_0 = 0.37 \cdot 2297 = 850 \text{ A}$$

การใช้ตารางของ Garrett และ Patel (Annex C หน้า 150)

Table C.1—Approximate equivalent impedances of transmission line overhead shield wires and distribution feeder neutrals

Number of transmission lines	Number of distribution neutrals	$R_{sg} = 15; R_{fg} = 25; R + jx (\Omega)$	$R_{sg} = 15; R_{fg} = 25; R + jx (\Omega)$
1	1	0.91 + j.485	3.27 + j.652
1	2	0.54 + j0.33	2.18 + j.412
1	4	0.295 + j0.20	1.32 + j.244
1	8	0.15 + j0.11	0.732 + j.133
1	12	0.10 + j0.076	0.507 + j0.091
1	16	0.079 + j0.057	0.387 + j0.069
2	1	0.685 + j.302	2.18 + j.442
2	2	0.455 + j.241	1.63 + j.324
2	4	0.27 + j.165	1.09 + j.208
2	8	0.15 + j0.10	0.685 + j.122
2	12	0.10 + j0.07	0.47 + j0.087
2	16	0.08 + j0.055	0.366 + j0.067

สายสติดเหนือศีรษะและสายป้อนนิวทรัลคือ

$$Z_{eq} = 0.91 + j0.485 \Omega$$

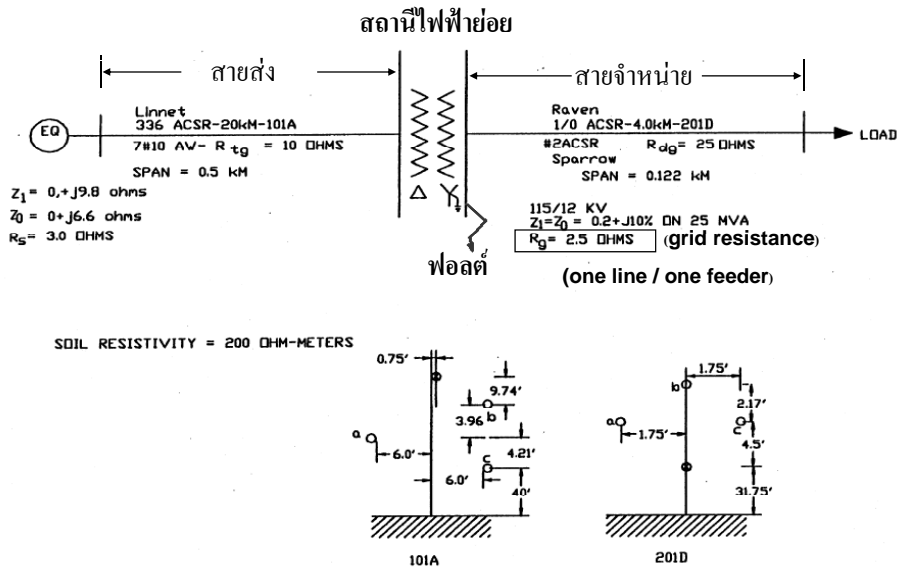
ตัวประกอบการแยกคือ

$$S_f = \left| \frac{Z_{eq}}{Z_{eq} + R_g} \right| = \left| \frac{0.91 + j0.485}{(0.91 + j0.485) + 2.5} \right| = 0.30$$

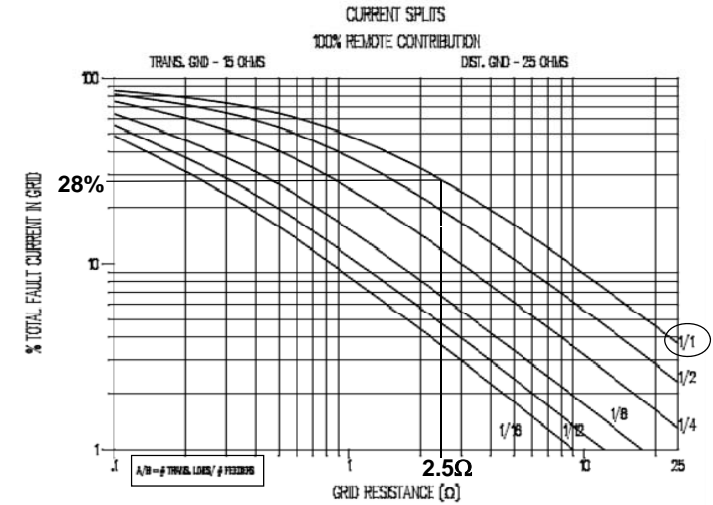
ดังนั้นกระแสกริดคือ

$$I_g = S_f \cdot 3I_0 = 0.30 \cdot 2297 = 689 \text{ A}$$

ตัวอย่างการหาตัวประกอบการแบ่งแยกกระแส S_f



การใช้เส้นโค้งตัวประกอบการแยกของ Garrett และ Patel (รูปที่ C.1 ใน Annex C หน้า 152)



จากกราฟ จึงได้ตัวประกอบการแบ่งโดยประมาณคือ

$$S_f = 0.28$$

ดังนั้นกระแสกริดคือ

$$I_g = S_f \cdot 3I_0 = 0.28 \cdot 2297 = 643 \text{ A}$$

3.10 ผลของความไม่สมมาตร

$$i_f(t) = \underbrace{\sqrt{2} \cdot E \cdot Y_{ac}}_{I_{\max}} \underbrace{\sin(\omega t + \alpha - \theta)}_{\text{ac component}} - \underbrace{e^{-t/T_a} \cdot \sin(\alpha - \theta)}_{\text{dc component}}$$

เมื่อ

$i_f(t)$ คือ กระแสโวลต์ไม่สมมาตร มีหน่วยเป็น A ที่เวลาทันทีใดๆ t ซึ่ง t มีหน่วยเป็น s

E คือ แรงดัน rms ก่อนเกิดฟอลต์ เป็นแรงดันสายกับนิวทรัล [V]

ω คือ ความเร็วเชิงมุม [rad/s]

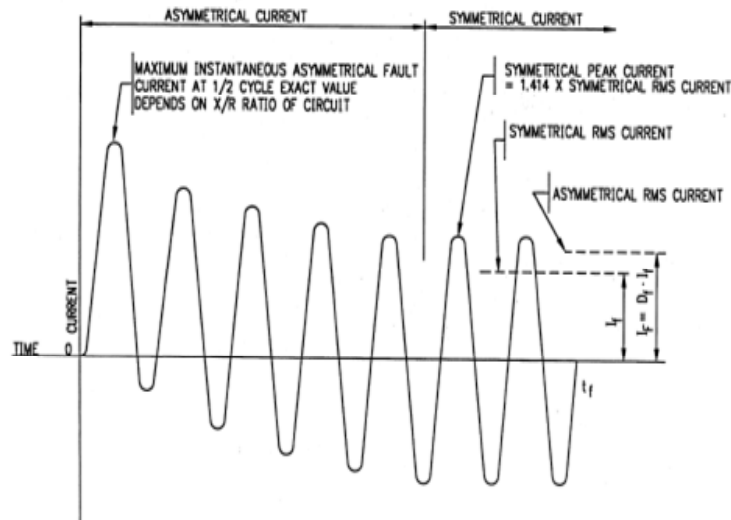
α คือ มุมแรงดันที่การเริ่มต้นกระแส [rad]

θ คือ มุมเฟสวางจร [rad]

Y_{ac} คือ แอดมิตแตนซ์ระบบ ac สมมูล [mho]

T_a คือ ค่าเวลาคงที่ของเฟส dc [s]

เมื่อ $T_a = X / (\omega R)$



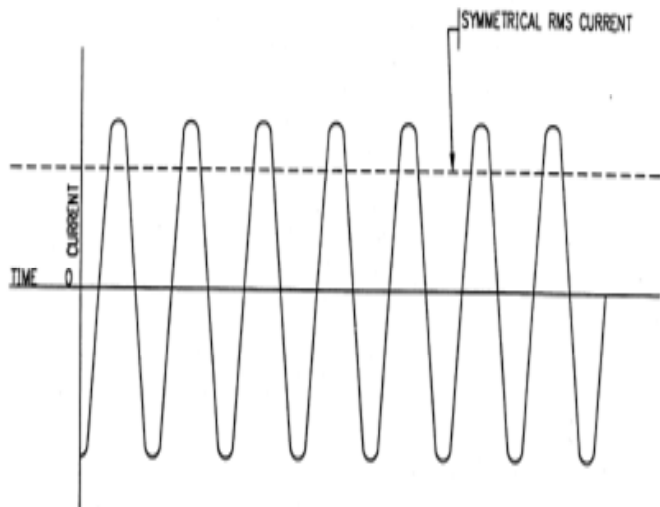
ออฟเซต dc สูงที่สุดเมื่อ $(\alpha - \theta) = -\pi/2$

$$i_f(t) = \sqrt{2} \cdot E \cdot Y_{ac} \left[\sin(\omega t + \frac{-\pi/2}{\alpha - \theta}) - e^{-t/T_a} \cdot \sin(\frac{-\pi/2}{\alpha - \theta}) \right]$$

$\sin(\omega t - \pi/2) = -\cos \omega t$
 -1

ดังนั้นสมการที่ (3.10) จึงกลายเป็น

$$i_f(t) = \sqrt{2}E \cdot Y_{ac} [e^{-t/T_a} - \cos(\omega t)]$$



กระแสฟอลต์ไม่สมมาตรประสิทธิผล I_F

- เนื่องจากกระแสเริ่มต้นกระตุกของกล้ำเนื้อ ตั้งอยู่บนพื้นฐานของรูปคลื่นไซน์ สมมาตรคงที่ มันแต่ค่ากระแสฟอลต์ rms สมมูลของรูปคลื่นกระแสไม่สมมาตร สำหรับเวลาสูงที่สุดของการถูกไฟดูดที่เป็นไปได้
- ดังนั้นค่านี้ จึงต้องสอดคล้องกันกับที่กำหนดของกระแสฟอลต์ไม่สมมาตร ประสิทธิผล I_F โดยการอินทิเกรตสมการที่ (3.11) ยกกำลังสองซึ่งเขียนสมการได้เป็น

$$I_F = \sqrt{\frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} [i_f(t)]^2 dt}$$

เมื่อ

I_F คือ ค่า rms ของกระแสไม่สมมาตรโดยประมาณสำหรับช่วงเวลาที่เกิดฟอลต์ทั้งหมด [A]

t_f คือ ช่วงเวลาของฟอลต์ [s]

t คือ เวลาหลังจากการเริ่มต้นของฟอลต์ [s]

ดังนั้น ตัวประกอบการลด D_f ถูกหาโดยอัตราส่วน I_F/I_r คือ

$$D_f = \frac{I_F}{I_r}$$

และ

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \left(1 - e^{-\frac{2t_f}{T_a}}\right)}$$

ตัวอย่างค่าของตัวประกอบการลดลงสำหรับช่วงเวลา
โหลดต่าง ๆ และอัตราส่วน X/R ถ้าแสดงในตารางที่

3.1

Fault duration, t_f		Decrement factor, D_f			
Seconds	Cycles at 60 Hz	X/R = 10	X/R = 20	X/R = 30	X/R = 40
0.008 33	0.5	1.576	1.648	1.675	1.688
0.05	3	1.232	1.378	1.462	1.515
0.10	6	1.125	1.232	1.316	1.378
0.20	12	1.064	1.125	1.181	1.232
0.30	18	1.043	1.085	1.125	1.163
0.40	24	1.033	1.064	1.095	1.125
0.50	30	1.026	1.052	1.077	1.101
0.75	45	1.018	1.035	1.052	1.068
1.00	60	1.013	1.026	1.039	1.052